中国分散式民用供热技术现状分析

刘新华[1*]　韩　健[1,2]　张　楠[1]　王晶晶[1,2]
1 中国科学院过程工程研究所 北京 100190
2 中国科学院大学 化学工程学院 北京 100049

摘要　民用散煤污染是造成北方地区严重灰霾天气的重要原因之一，因此各地政府积极推进散煤替代，尤其是在京津冀地区大力推广所谓“清洁能源”，进行煤改电/气相关工作，在周边地区则推行使用优质无烟煤或兰炭，但效果并不理想。文章对我国几种典型分散式民用供热技术进行了对比分析，认为推行煤改电/气需要考虑当地资源、地理和经济条件以及生活习惯，且最关键的是要在经济上可承受；在经济相对落后的边远农村地区推广诸如在解耦炉等环保炉具中燃烧烟煤型煤进行清洁供暖应当成为一项长期政策，以从根本上解决我国农村的散煤污染问题。

关键词　散煤污染，分散式供热，解耦燃烧，烟煤型煤

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2019.04.004

为了降低民用散煤燃烧污染，各地政府积极推进散煤替代。尤其是在京津冀地区大力推广所谓“清洁能源”，进行煤改电/气相关工作，在周边地区则推行使用优质无烟煤或兰炭，然而效果并没有预想中的好。事实上，并不存在绝对意义上的清洁能源。电和天然气被称为清洁能源是相对煤炭而言的，况且煤炭燃烧造成大气污染也并不完全是煤炭本身的问题，而是与煤炭能源利用系统密切相关。因此，本文将对我国分别以电和天然气为代表的清洁能源以及以无烟煤/兰炭和洁净型煤为代表的煤炭燃料作为热源的分散式民用供热技术进行对比分析，从而为我国散煤污染治理政策的执行和完善提供参考。

1 民用供热背景

近年来，随着居民生活水平持续提高和城镇化的不断发展，我国冬季供暖面积以年均约10%的速度飞速增长，采暖区域甚至由传统的黄河以北扩展到了长江以南。截至2016年底，我国北方地区城乡建筑取暖总面积约206亿平方米。其中，城镇建筑取暖面积141亿平方米，农村建筑取暖面积65亿平方米[1]。

由于中国能源“富煤、贫油、少气”的结构特

*通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA21040400）
修改稿收到日期：2019年3月21日

征，北方地区取暖主要以燃煤为主，且在广大农村和一些城乡接合部大多使用燃煤炉具分散供热。据不完全统计，在我国1.6亿户农村居民家庭中，采取分散采暖模式的约有9 300万户，其中燃煤采暖约6 600万户，年散煤使用量约2亿—3亿吨，占到煤炭终端消费量的10%左右[2]。传统民用燃煤炉具热效率一般不足40%，在燃烧劣质煤过程中产生大量以氮氧化物（NO_x）、二氧化硫（SO_2）、一氧化碳（CO）以及颗粒物（PM）等为主的空气污染物。但由于是刚性需求且缺乏有效控制，传统民用燃煤炉排放的污染物却占到燃煤污染物排放总量的30%—50%以上，是造成严重灰霾天气的重要原因之一[3-5]。

2016年12月21日，习近平总书记主持召开中央财经领导小组第十四次会议时指出，推进北方地区冬季清洁取暖问题是大事，关系广大人民群众生活，是重大的民生工程、民心工程。为确保北方地区群众安全取暖过冬，2018年7月3日国务院印发《关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知》（国发〔2018〕22号），指出"坚持从实际出发，宜电则电、宜气则气、宜煤则煤、宜热则热，确保北方地区群众安全取暖过冬"。

目前，清洁取暖主要是指利用天然气、电、洁净煤炭等清洁化能源，通过高效用能系统实现低排放、低能耗的取暖方式。清洁取暖包含以降低污染物排放和能源消耗为目标的取暖全过程。从实际出发就是要因地制宜，对于具有集中供热管网、建筑密度高的大中型城市可采用集中供热方式；而在受经济、地理条件和生活习惯限制的城乡接合部和乡村，就需要采用分散式供热方式[1]。

2 分散式电/天然气供热可行性分析

电作为一种非常清洁的能源，在采取直接加热取暖过程中的热转化效率几乎可以达到100%，且没有任何污染物排放。我国2018年的总发电量高达7.08万亿千瓦时，其中燃煤发电量4.92万亿千瓦时，占比达到了69.5%左右[6]。相对于化石燃料来说，电是一种高品质的能量形式。这种从低品质能量到高品质能量的转化过程中，必然伴随着不可逆的能量损失。即使是目前我国最先进的燃煤发电厂，其发电效率一般也不超过40%。因此从能量利用角度来说，用电来取暖非常不经济。而天然气虽然在燃烧过程中SO_2和PM的排放量极低；但由于其较高的燃烧温度，会在燃烧中将空气中的氮气氧化成NO_x。因而，天然气也并不是绝对清洁的能源。

2.1 煤改电/气的前提条件分析

采取煤改电/气的措施来进行散煤污染治理必须首先考虑至少两个前提条件：是否具有充足的电/气资源，以及是否具备将其输送到分散热用户的条件。这也是从实际出发、因地制宜原则的体现。

（1）不具备充足的电/气资源。以京津冀及周边地区为例，国家电网公司在该区域重点实施城市棚户区和农村煤改电累计达126万户时，这种大规模煤改电已经对当地电网运行造成了巨大压力，甚至使当年区域电网冬季最大负荷首次超过夏季尖峰负荷，给电网的安全运行带来隐患[8]。而对于使用天然气来说，从全国范围来讲，2005—2010年国内天然气商品量年均增长17%，而同期天然气需求量却增长26%。预计到2020年，天然气需求量将达到2 000亿立方米，而同期产量却只能达到1 100亿立方米，缺口900亿立方米[7]。因此，我国的天然气资源总量不足以支撑全国范围内的大规模煤改气工作。

（2）不具备将资源输送到分散热用户的条件。根据北京市农村工作委员会2013年6月提供的数据，北京市远郊区县现有行政村庄3 590个，2020年将整合成1 906个。其中，约有1409个村处于平原地区，497个村处于山区。从人口居住集中性、气源条件、规划道路等多种因素初步判断，即使在北京市平原地

区农村也有约40%—50%的村庄不具备市政天然气管道铺设条件，更不用谈那些具有天然地理屏障的山区村庄[9]。显然，即使是在集中推行煤改电/气的京津冀及周边地区，部分偏远乡村采取包括燃煤取暖在内的其他清洁供热措施也是必要的。

2.2 大规模煤改电/气的经济成本分析

在电/气资源充裕并且具备上述前提条件的地区，能否实行大规模煤改电/气的关键还取决于在经济上是否可承受这一必要条件。这里的经济主要包括前期电网改造或管道铺设投资，以及后期取暖设备购买和燃料使用成本两方面。仍然以煤改电为例，国家电网公司2017年为此安排了310.8亿元专项资金用于煤改电配套电网增容和扩容建设，截至当年9月底累计完成京津冀及周边地区居民煤改电用户175万户，户均投资达到了17 760元[10]。对于煤改气，北京市昌平区辛店村和平谷区蔡坨村分别约有450户和250户居民，而煤改气涉及的中低压管道铺设、低压调压箱建设、燃气灶具或供暖热水炉购买等费用均摊到每户的平均造价分别高达32 900元和34 250元[9]。这些资金投入都给当地政府和相关企业带来了巨大的压力。

从能量利用系统方面分析，以电为能源的分散式供热技术包括利用发热电缆、电热膜、蓄热电暖器以及各类电驱动热泵来供热，其中应用最广的是空气源热泵技术。该技术利用逆卡诺循环原理，通过输入电力从低品位的空气中提取热能，输送给供热装置使用。与将电能直接转化为热相比，利用空气源热泵有助于提高能效比（COP）。但空气源热泵的性能在室外温度极低的严寒和高湿地区会显著下降，当温度为−20℃—0℃时的平均能效比一般不高于2[11]，因而限制了该技术可以大规模使用的范围。分散式燃气供热主要通过燃气壁挂炉来实现，该技术较为成熟，产业支撑和市场化能力较强，用户接受程度高，在城市煤改气工程中应用最为广泛。但典型天然气壁挂炉的 NO_x 排放浓度折算成基准氧含量为9%时一般不低于170 mg/m^3，这使得该技术的减排优势在越来越严格的低氮排放要求下并不明显[12]。

煤改电/气后的燃料成本虽然与用户的使用环境、使用要求和使用习惯密切相关，但我们仍然可以从单位热值价格的角度来将它们与清洁燃煤取暖进行直观对比。如表1所示，天然气取暖的燃料成本将是清洁燃煤取暖的2.27倍，而采用直热或蓄热式电采暖的燃料成本则是清洁燃煤取暖的3倍。即使考虑空气源热泵技术的使用，其燃料成本也达到了清洁燃煤取暖的1.5倍。因此，为了使煤改电/气的农民用户在经济上可承受，许多地方政府在电/气价格和取暖器成本方面进行补贴。例如，京津冀各地政府对于蓄热电暖器最高补贴1 200元/台，空气源热泵最高补贴25 000元/台，并采取居民电采暖低谷价0.3元/度的电价，以及运行补贴政策[8]。这不仅给地方财政带来了巨大的压力，而且随着清洁供暖面积的进一步加大，气量和价格双吃紧的状态可能还会越来越明显。

表1 不同燃料使用成本比较

燃料		单价	热值单位	热效率	单位热值价格	单位热值价格比较*
洁净型煤		800元/吨	5 500千卡/千克	75%	0.0194分/千卡	1
天然气		3元/立方米	8 000千卡/立方米	85%	0.0441分/千卡	2.27
电	空气源热泵	0.5元/度	860千卡/度	200%	0.0291分/千卡	1.50
	直热或蓄热	0.5元/度	860千卡/度	100%	0.0581分/千卡	3.00

*以洁净型煤的单位热值价格为基准值1进行比较

2.3 小结

综上所述，煤改电/气首先需要在电网改造或燃气市政管道铺设方面投入大量资金，然后再对煤改电/气用户进行供热设备和燃料使用成本补贴，至少达到或接近传统燃煤取暖成本的水平才有可能被广大分散热用户所接受。由于每个冬季都需要供暖，那些单靠政府投资和高额财政补贴的实施方案显然是不可持续的。例如，山东城乡居民采暖以燃煤为主，尽管各级政府依靠行政手段出台了煤改气/电等清洁供热补贴政策，但却难以长期为继；并且因清洁采暖运行费用高，低收入城乡居民对煤改气/电等清洁采暖方式的接受度也较低[13]。因此，煤改电/气取代散煤的清洁供热方案只有在资源较丰富、政府有条件、用户可承受的条件下才可能取得长期效果，“一刀切”的去煤化政策不能完全解决我国的散煤污染问题。

3 分散式清洁燃煤供热分析

2017年底以来，北方地区清洁取暖改造从最初的“宜电则电、宜气则气”调整为“宜电则电、宜气则气、宜煤则煤、宜热则热”，从而扭转了清洁取暖就是去煤化的思维[14]。

实际上，为降低农村散煤燃烧污染，我国各地在推进减煤换煤增效方面做了大量工作，但效果却并不理想。例如，通过燃烧无烟煤、兰炭等所谓的“洁净煤”以减少黑烟排放。特别是兰炭，由于它是高挥发分烟煤在中低温条件下干馏热解得到的较低挥发分固体炭质产品，相比无烟煤燃烧的 NO_x 和 SO_2 排放相对要低一些，因此在我国的山东和陕西等地进行了较大规模示范应用。但由于无烟煤和兰炭一般均采用正烧式炉具燃烧，因而燃烧过程中氧不足导致产生大量的CO[15]。而且，兰炭和无烟煤均存在资源少和价格高的问题，尤其是还存在难点火、上火慢、火力弱等缺点，因而炉具炊事功能先天不足。这不符合农民用户的使用习惯，因此老百姓也不喜欢使用。本质上，将洁净煤定义为无烟煤或兰炭一类的低挥发分燃料并不科学，而且也不存在完全洁净的煤炭燃料。虽然我国煤种多样，但主要是以高挥发分烟煤为主。如果采用合理的炉具设计和科学的燃烧方式，燃烧烟煤也可以达到大幅节能减排的效果。这其中的核心关键问题不在于烧什么煤，而在于利用什么燃烧技术和何种环保炉具来烧煤并达到什么样的排放效果[16]。

传统的民用燃煤炉一般采用正烧、反烧或正反烧相结合的燃烧方式。传统正烧炉中空气和烟气同时向上流动，这会导致挥发分和CO燃烧不充分，易冒烟，不适用于燃烧烟煤；传统反烧炉中空气向下而烟气向上流动，这虽然有利于挥发分的燃尽，但CO的燃烧仍不充分，且不适用于低挥发分燃料的燃烧。而采用做饭正烧、取暖反烧、多级供风的燃烧形式设计的民用炊暖燃煤炉相比于市售锅炉，却具有燃烧效率高、污染物排放低等优点[17]。

煤炭的燃烧过程是包含煤炭热解气化和挥发分以及半焦燃烧的复杂化学反应网络，在煤炭热解过程中生成的还原性气体以及高温半焦都对 NO_x 具有明显的还原作用[18]。基于此原理，中国科学院过程工程研究所早在1995年就发明了解耦燃烧技术，致力于解决民用燃煤炉 NO_x 排放和冒黑烟的难题[19]。尽管当时我国对 NO_x 的减排问题并没有提出明确的要求，但经过20多年持续不断地发展和完善，解耦燃烧已经成为一种可以同时有效降低中小型燃煤锅炉 NO_x、CO和黑烟排放的实用技术，从而为解决我国农村的煤炭散烧污染问题提供了可能的途径[20,21]。

与空气和烟气同/逆向流动的传统正/反烧炉不同，解耦燃煤炉具有底部连通的两个分别被称为热解室和燃烧室的并列炉膛，煤炭从热解室上部加入，而空气则通过热解室底部的倾斜炉排引入（图1a）。这样，部分空气、半焦燃烧烟气以及热解气就会先在热解室混合，然后才在烟囱的拔力作用下依次穿过半焦层和燃烧室后从烟囱排出[22]。在此过程中，煤炭先后经

历了在热解区低温还原条件下的煤炭热解过程和在燃烧区高温氧化条件下的热解气以及半焦的燃烧过程，从而充分利用煤炭热解自身产生的还原性热解气和高温半焦来抑制和还原 NO_x（图 1b）。若采用资源丰富、价格低廉的烟煤为原料，通过混合高效固硫剂制成洁净烟煤型煤，并采用“洁净型煤+解耦炉具”匹配燃烧的模式，则不仅可以继承烟煤易燃烧、上火快、火力强、燃尽率高的特点，还可实现对 SO_2、NO_x 和 CO 的同时控制，并进行高效固灰和降尘，从而降低综合污染物排放，提高炉具热效率。

实验和模拟研究表明[22,23]，利用解耦炉具燃烧烟煤型煤也可达到“无烟排放”的标准，炉内固硫率可达 60% 以上，PM 排放与燃烧无烟煤或半焦相当，炊事功率高于 1.5 kW，满足了广大农民用户“既要取暖，也要做饭”的习惯性需求。与传统燃煤炉燃烧散煤相比，利用解耦炉具燃烧烟煤型煤时的 NO_x 排放可降低 30%—45%，节煤量可达 20%—30%。中国科学院过程工程研究所与兖矿集团有限公司合作，已在山东邹城的多个乡镇和村庄推广解耦炉具 2 万余台，洁净型煤 4.6 万多吨，受到广大农民用户的好评。今年还在河北承德的隆化和围场两县进行了“洁净型煤+解耦炉具”示范应用，并致力于建成承德民用清洁供暖示范区。

因此，相比于散煤直燃直排，目前的高效环保民用燃煤炉设计技术已经可以实现利用资源丰富的烟煤资源进行清洁高效分散式供热。采取解耦燃烧或者正烧、反烧相结合的方式来燃烧洁净烟煤型煤以优化配风，并设置与燃料性质相适应的炉膛尺寸和结构以及换热面等，是提高炉具热效率、减少污染物排放的有效手段，也是未来分散式民用燃煤清洁高效供热技术的发展趋势。在我国能源现状和经济发展水平条件下，采取“煤炉匹配”技术是目前解决民用散煤燃烧污染的最经济、有效和可行的措施之一。我们不仅没有必要“谈煤色变”和进行“一刀切”去煤化，而且在那些煤改电/气无法企及的城乡接合部或边远农村和山区推广清洁燃煤，特别是“烟煤型煤+环保炉具”进行分散式供热，还应该成为一项长期政策。

4 结语

为了治理我国散煤污染、实现清洁供暖，需要从实际出发，因地制宜，多措并举，多能互补。环保政策的推行需要首先考虑资源和地理条件的限制，其次是基础设施投资，然后还要考虑老百姓的生活习惯等，但决定性的因素之一是供热设备和燃料使用成本。居民在经济上可承受是任何一项清洁供热措施可

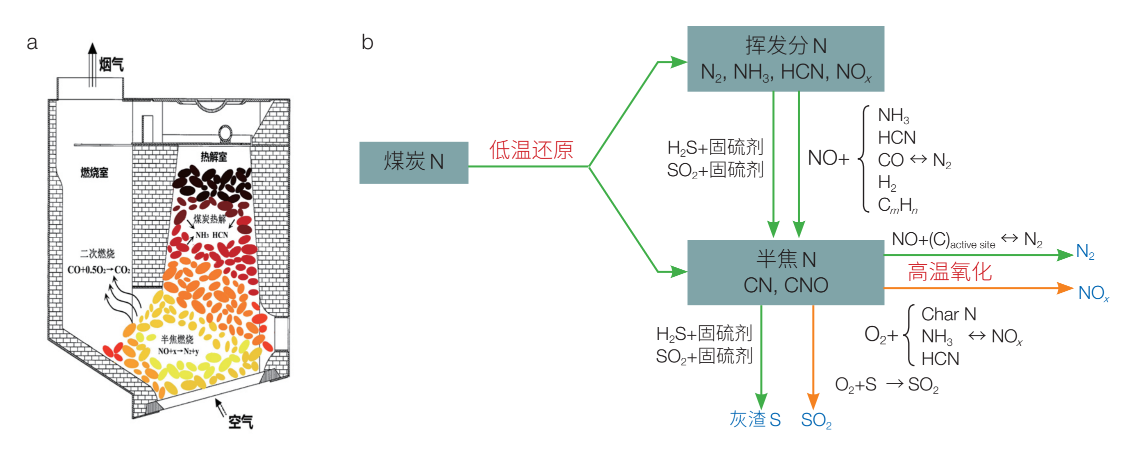


图 1 解耦燃烧技术原理

（a）解耦炉结构示意图；（b）解耦炉降氮固硫路线

长期执行的必要条件。因此，本文提出以下建议。

（1）从全国范围内来看，散煤污染治理应严格遵循因地制宜的原则。根据我国能源赋存特点和经济发展水平，对大中型城镇建成区和集中居住片区应主张进行集中供热，且在具备相关条件和经济发展较好的部分区域鼓励采用天然气或电供热，但在经济相对落后的城乡接合部或边远农村和山区，应坚持推广分散式清洁燃煤或其他经济供热技术。

（2）在适用分散式燃煤清洁供热区域，要健全准入制度和规范，完善激励和扶持政策。在制度和政策层面明确鼓励和支持节能环保炉具和洁净型煤生产技术的开发应用，通过出台有针对性的节能减排政策，提高行业标准和准入门槛，以逐步淘汰落后的传统散煤燃烧供热技术。

（3）在分散式燃煤清洁供热示范应用已取得初步成效的区域，应进一步推进分散式供热专业化管理。对农村分散热用户进行专业化管理，推进洁净型煤和环保炉具的生产标准化、配送规范化和服务市场化，形成可持续发展和可复制推广的长效运营机制。

总之，为统筹解决农村煤炭散烧污染问题和带动农村城镇化发展，让农民分享科学的现代化生活方式，在广大农村和城郊地区坚持大规模推广使用节能环保解耦炉具，并配套质优价廉的改性烟煤型煤，可望从根本上解决我国农村的煤炭散烧污染问题，从而改善农民生活，减少雾霾天的发生。

致谢 感谢解耦燃烧技术的发明人李静海院士对该技术研究、应用和推广工作的长期大力支持和帮助。

参考文献

1 国家发展改革委，国家能源局，财政部，等. 北方地区冬季清洁取暖规划（2017—2021年）. [2017-12-05]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/content_5248855.htm.

2 中国农村能源行业协会节能炉具专业委员会. 中国供暖炉具行业发展报告（2016）. 北京：北京华煤至信文化发展有限公司, 2016.

3 武建军，郭凡辉，孙少杰，等. 中国民用煤洁净化利用现状及展望. 洁净煤技术, 2017, 23(4): 1-11.

4 霍沫霖，赵佳，徐朝，等. 中国散烧煤消费地图及影响因素研究. 中国电力, 2017, 50(1): 1-8.

5 Li Q, Jiang J K, Qi J, et al. Improving the energy efficiency of stoves to reduce pollutant emissions from household solid fuel combustion in China. Environ Sci Technol Lett, 2016, (3): 369-374.

6 李际，樊慧娴. 2018年我国电力发展形势及2019年展望. 电力, 2019, 41(2): 19-24.

7 刘淑玲，芮磊. 乌鲁木齐市“煤改气”工程实施考察报告. 中共乌鲁木齐市委党校学报, 2013, (4): 56-61.

8 吴亮，吴迪，解岩，等. 京津冀农村“煤改电”运行情况分析. 电力需求侧管理, 2018, 20(4): 36-41.

9 刘江涛，高慧明，刘建伟，等. 北京市农村“煤改气”燃气供应相关技术研究. 煤气与热力, 2016, 36(9): 27-32.

10 董谷媛. “煤改电”的国网行动. 国家电网, 2017, 173(12): 26-29.

11 李爱松，李忠，聂晶晶，等. 北京农村空气源热泵供暖项目运行实测. 暖通空调, 2017, 47(12): 138-142.

12 刘效洲，华贲，耿生斌. 壁挂燃气炉污染物排放特性的实验研究. 煤气与热力, 2005, 25(2): 5-8.

13 于红，张一清，宋华岭. 山东省城乡居民冬季清洁采暖分析. 山东工商学院学报, 2018, 32(5): 27-33.

14 国家发展改革委办公厅，国家能源局综合司. 关于加大清洁煤供应确保群众温暖过冬的通知. [2017-12-25]. http://www.nea.gov.cn/2017-12/28/c136856837.htm.

15 张鑫. 兰炭替代无烟煤高效清洁利用的研究. 洁净煤技术, 2015, 21(3): 103-106.

16 张绍强. 民用燃煤取暖重点要抓“高效炉具”. [2018-08-20]. http://www.china-nengyuan.com/news/127668.html.

17 程芳琴，彭浩，吴海滨，等. 小型家用炉技术现状及检测评

价方法. 洁净煤技术, 2018, 24(1): 19-25.

18 He J D, Song W L, Gao S Q, et al. Experimental study of the reduction mechanisms of NO emission in decoupling combustion. Fuel Process Technol, 2006, (87): 803-810.

19 李静海, 许光文, 杨励丹, 等. 一种抑制氮氧化物的无烟燃煤方法及燃煤炉: 中国, 95102081.1. 1998-04-23.

20 郝江平, 孙广藩, 李静海, 等. 一种燃煤解耦燃烧装置及燃烧方法: 中国, 201310381627.7. 2016-06-29.

21 刘新华, 郝江平, 张楠, 等. 一种解耦燃烧装置及燃烧方法: 中国, 201710512563.2. 2017-06-29.

22 Li H L, Han J, Zhang N, et al. Effects of high-temperature char layer and pyrolysis gas on NO_x reduction in a typical decoupling combustion coal-fired stove. J Therm Sci, 2018, 28(1): 40-50.

23 韩健, 刘新华, 何京东, 等. 民用解耦燃煤炉中的NO_x和CO同时减排. 化工学报, 2019, DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20181327.

Status of Decentralized Civil Heating Technology in China

LIU Xinhua[1*] HAN Jian[1,2] ZHANG Nan[1] WANG Jingjing[1,2]

(1 Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The pollution from bulk coal combustion was thought to be one of the main causes of haze weather in northern China, so governments everywhere tried to promote the search for an alternative to civil bulk coal. Specially, so-called “clean energy” was vigorously promoted and coal-to-electricity or natural gas conversion project was implemented in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area, while burning high-quality anthracite and semicoke was encouraged in the surrounding areas, though giving rise to unsatisfactory influence finally. Several typical decentralized civil heating technologies in China were comparatively analyzed in this article. It is suggested that the coal-to-electricity or natural gas conversion project must be on the premise of rich resources, suitable geographic conditions, and high-level economic development as well as conforming to living habits of the local people, among which the economic affordability is one of the key factors to success. In order to solve the pollution problem of bulk coal combustion in remote low-income rural areas thoroughly, a long-term plan should be made to realize clean heating by burning bituminous briquette in environment-friendly domestic furnaces such as decoupling combustion stoves.

Keywords bulk coal combustion pollution, decentralized heating, decoupling combustion, bituminous briquette

*Corresponding author



刘新华　中国科学院过程工程研究所研究员。1998 年和2001 年在中国石油大学分别获得工学学士和硕士学位，2005 年在中国科学院过程工程研究所获得工学博士学位后留所工作，2008 年在加拿大不列颠哥伦比亚大学进行为期 1 年的访问研究。主要从事煤炭清洁利用、流态化工程和虚拟过程工程相关研究，目前是中国科学院战略性先导科技专项（A 类）课题“散煤低 NO_x 解耦燃烧技术与示范”的负责人。E-mail: xhliu@ipe.ac.cn

LIU Xinhua　Researcher at Institute of Process Engineering (IPE), Chinese Academy of Sciences (CAS). He received his B.S. and M.S. degrees from China University of Petroleum (CUP) in 1998 and 2001 respectively, and Ph.D. degree from IPE, CAS in 2005. He successfully applied a position as a visiting professor for the period of one year at the University of British Columbia (UBC) in 2008. After he came back to IPE in 2009, his research interest moves to the fields of clean utilization of coal, fluidization engineering and virtual process engineering. He is now the project leader of Strategic Priority Research Program on Research and Demonstration of Low-NO_x Decoupling Combustion of Civil Bulk Coal of CAS.
E-mail: xhliu@ipe.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

参考文献（双语版）

1 国家发展改革委，国家能源局，财政部，等. 北方地区冬季清洁取暖规划（2017—2021年）. [2017-12-05]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/content_5248855.htm.

National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Finance of the PRC. Clean heating plan in winter in northern China (2017—2021). [2017-12-05]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/content_5248855.htm. (in Chinese)

2 中国农村能源行业协会节能炉具专业委员会. 中国供暖炉具行业发展报告（2016）. 北京: 北京华媒至信文化发展有限公司, 2016.

Energy-saving Stove Committee, China Association of Rural Energy Industry. China heating stoves industry development report (2016). Beijing: Beijing Huamei Zhixin Culture Development Co., Ltd. 2016. (in Chinese)

3 武建军，郭凡辉，孙少杰，等. 中国民用煤洁净化利用现状及展望. 洁净煤技术, 2017, 23(4): 1-11.

Wu J J, Guo F H, Sun S J, et al. Status and prospect of cleaning utilization of civil coal in China. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 1-11. (in Chinese)

4 霍沫霖，赵佳，徐朝，等. 中国散烧煤消费地图及影响因素研究. 中国电力, 2018, 51(1): 139-146.

Huo M L, Zhao J, Xu Z, et al. China scattered coal consumption map and influence factors. Electric Power, 2018, 51(1): 139-146. (in Chinese)

5 Li Q, Jiang J K, Qi J, et al. Improving the energy efficiency of stoves to reduce pollutant emissions from household solid fuel combustion in China. Environmental Science & Technology Letters , 2016, 3(10): 369-374.

6 李际，樊慧娴. 2018年我国电力发展形势及2019年展望. 中国能源, 2019, 41(2): 19-24.

Li J, Fan H X. Review of China electric power development in 2018 and prospects in 2019. Energy of China, 2019, 41(2): 19-24. (in Chinese)

7 刘淑玲，芮磊. 乌鲁木齐市“煤改气”工程实施考察报告. 中共乌鲁木齐市委党校学报, 2013, (4): 56-61.

Liu S L, Rui L. Investigation report on the implementation of “coal to gas” project in Urumqi. Journal of the Party School of CPC Urumqi Municipal Committee, 2013, (4): 56-61. (in Chinese)

8 吴亮，吴迪，解岩，等. 京津冀农村“煤改电”运行情况分析. 电力需求侧管理, 2018, 20(4): 36-41.

Wu L, Wu D, Xie Y, et al. Performance analysis of rural “Coal to Electricity” in Beijing-Tianjin-Hebei. Power Demand Side Management, 2018, 20(4): 36-41. (in Chinese)

9 刘江涛，高慧明，刘建伟，等. 北京市农村“煤改气”燃气供应相关技术研究. 煤气与热力, 2016, 36(9): 27-32.

Liu J T, Gao H M, Liu J W, et al. Study on related technologies of gas supply for coal to gas in rural area of Beijing City. Gas & Heat, 2016, 36(9): 27-32. (in Chinese)

10 董谷媛. “煤改电”的国网行动. 国家电网, 2017, (12): 26-29.

Dong G Y. State Grid Action of “Coal to Electricity”. State Grid, 2017, (12): 26-29. (in Chinese)

11 李爱松，李忠，聂晶晶，等. 北京农村空气源热泵供暖项目运行实测. 暖通空调, 2017, 47(12): 138-142.

Li A S, Li Z, Nie J J, et al. Field measurement of air-source heat pump heating systems for rural residences of Beijing. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(12): 138-142. (in Chinese)

12 刘效洲，华贲，耿生斌. 壁挂燃气炉污染物排放特性的实验研究. 煤气与热力, 2005, 25(2): 5-8.

Liu X Z, Hua B, Geng S B. Experimental research on pollutant emission characteristic of wall-type gas heater. Gas & Heat, 2005, 25(2): 5-8. (in Chinese)

13 于红，张一清，宋华岭. 山东省城乡居民冬季清洁采暖分

析. 山东工商学院学报, 2018, 32(5): 27-33.

Yu H, Zhang Y Q, Song H L. Analysis on winter clean heating of urban and rural residents in Shandong Province. Journal of Shandong Technology and Business University, 2018, 32(5): 27-33. (in Chinese)

14 国家发展改革委办公厅, 国家能源局综合司. 关于加大清洁煤供应确保群众温暖过冬的通知. [2017-12-25]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201712/t20171226_962628.html?code=&state=123.

General Office of National Development and Reform Commission, Comprehensive Department of National Energy Administration. Notice on increasing the supply of clean coal to ensure the warm winter of the masses. [2017-12-25]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201712/t20171226_962628.html?code=&state=123. (in Chinese)

15 张鑫. 兰炭替代无烟煤高效清洁利用的研究. 洁净煤技术, 2015, 21(3): 103-106.

Zhang X. Feasibility on semicoke substitute for anthracite in energy conservation and emissions reduction. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 103-106. (in Chinese)

16 张绍强. 民用燃煤取暖重点要抓"高效炉具". [2018-08-20]. http://www.china-nengyuan.com/news/127668.html.

Zhang S Q. Focus on "efficient stove" for civil coal heating. [2018-08-20]. http://www.china-nengyuan.com/news/127668.html. (in Chinese)

17 程芳琴, 彭皓, 吴海滨, 等. 小型家用炉技术现状及检测评价方法. 洁净煤技术, 2018, 24(1): 19-25.

Cheng F Q, Peng H, Wu H B, et al. Performance evaluation and technical status of the small coal furnace. Clean Coal Technology, 2018, 24(1): 19-25. (in Chinese)

18 He J D, Song W L, Gao S Q, et al. Experimental study of the reduction mechanisms of NO emission in decoupling combustion of coal. Fuel Processing Technology, 2006, 87(9): 803-810.

19 李静海, 许光文, 杨励丹, 等. 一种抑制氮氧化物的无烟燃煤方法及燃煤炉: 中国, 95102081.1. 1998-04-23.

Li J H, Xu G W, Yang L D, et al. Smokeless coal-burning for inhibiting nitrogen oxides and coal-burning furnace: China, 95102081.1. 1998-04-23. (in Chinese)

20 郝江平, 孙广藩, 李静海, 等. 一种燃煤解耦燃烧装置及燃烧方法: 中国, 201310381627.7. 2016-06-29.

Hao J P, Sun G P, Li J H, et al. Coal decoupling combustion device and method: China, 201310381627.7. 2016-06-29. (in Chinese)

21 刘新华, 郝江平, 张楠, 等. 一种解耦燃烧装置及燃烧方法: 中国, 201710512563.2. 2017-06-29.

Liu X H, Hao J P, Zhang N, et al. A decoupling combustion device and method: China, 201710512563.2. 2017-06-29. (in Chinese)

22 Li H L, Han J, Zhang N, et al. Effects of high-temperature char layer and pyrolysis gas on NOx reduction in a typical decoupling combustion coal-fired stove. Journal of Thermal Science, 2018, 28(1): 40-50.

23 韩健, 刘新华, 何京东, 等. 民用解耦燃煤炉中的NO_x和CO同时减排. 化工学报, 2019, 70(5): 1991-1998.

Han J, Liu X H, He J D, et al. Simultaneous reduction of NOx and CO emissions in domestic decoupling coal-fired stoves. CIESC Journal, 2019, 70(5): 1991-1998. (in Chinese)